

## 5 Resultados experimentais em compensação da PMD em 43Gb/s

### 5.1. Compensação da PMD pelo desvanecimento de um sinal de 40GHz

Para uma avaliação inicial do desempenho do compensador de PMD (PMDC) em 40Gb/s, foi realizado um teste, utilizando um gerador de frequência de 40GHz como sinal de modulação, uma vez que um analisador de BER de 40GB/s não estava disponível. Um emulador de PMD de 12ps foi utilizado para gerar a distorção no sinal modulado. Após a detecção do sinal óptico, o sinal elétrico de alta frequência foi amplificado e transformado em um nível de tensão contínuo equivalente à amplitude do sinal modulado através de um detector de RF. Tal nível DC foi adquirido a uma taxa de 10 kS/s e amostrado em intervalos de tempo de forma a se ter uma estatística representativa da evolução da PMD no emulador. Uma medição da referência foi feita sem o PMDC na linha conforme a figura 41.

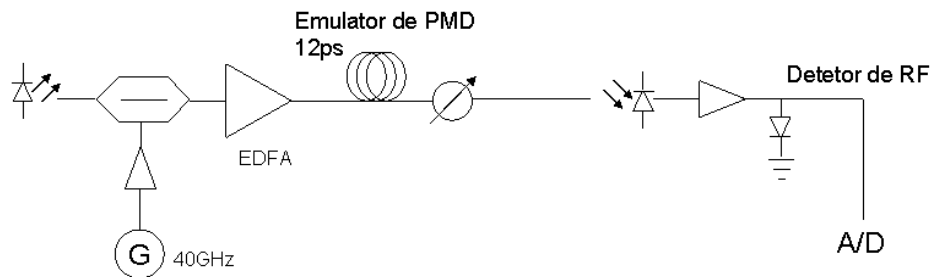


Figura 41 - Montagem do experimento para a verificação da flutuação do sinal de RF em função da PMD.

Para acelerar as flutuações de PMD, o emulador foi exposto a mudanças de temperatura com tempos de variação diversos, através de lâmpadas incandescentes que foram acesas e apagadas aleatoriamente e soprador térmico.

Posteriormente com o PMDC no enlace, conforme ilustrado na figura 42, foi realizada a medição da intensidade após o detector de RF. Tal medição já nos mostra um bom desempenho do PMDC, uma vez que, o desvanecimento do sinal de RF tem uma forte correspondência com a medida de BER para o caso da distorção por PMD [32-35]. Uma linha de atraso de secção única com 18ps de PMD foi utilizada no PMDC.

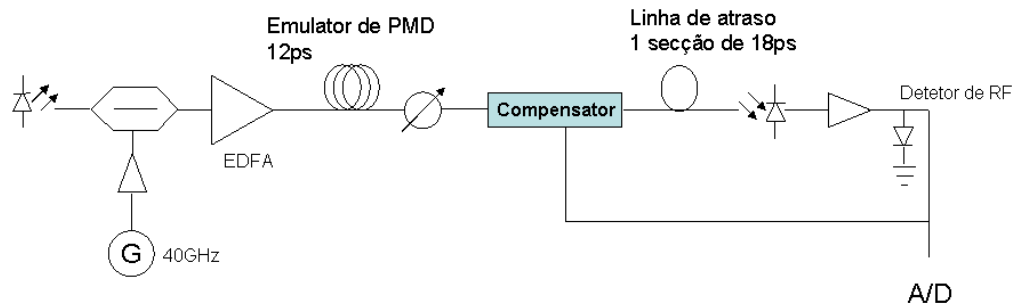


Figura 42 - Montagem do experimento para a avaliação do compensador de PMD sob flutuação do sinal de RF puro em função da PMD.

Os resultados obtidos com e sem compensação, que são mostrados na figura 43, demonstraram um excelente desempenho do PMDC sob as circunstâncias expostas, onde a média normalizada passou de 0,59 para 0,96 e o desvio padrão de 0,19 para 0,02.

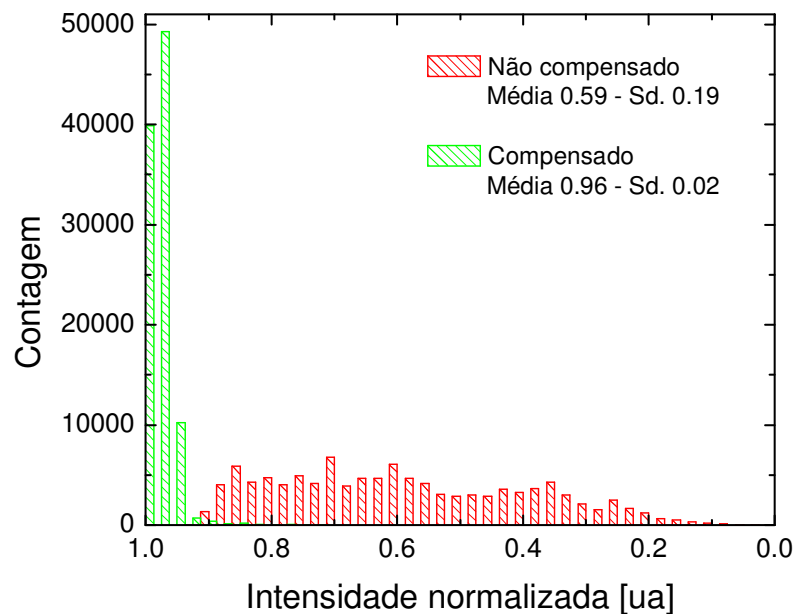


Figura 43 – Intensidade do sinal de RF de 40GHz com o sistema compensado e não compensado em presença de um emulador de PMD de 12ps.

## 5.2. O mapa de contorno da PMD

Para um teste confiável da tolerância de um sistema aos efeitos da PMD é necessária não somente a inserção da DGD e SOPMD no enlace, mas também a rotação destes vetores na esfera de Poincaré. Para isso, dois métodos foram utilizados para a verificação do desempenho do PMDC no sistema de transmissão.

A maior parte dos testes foi feita com uma fonte de PMD (PMDS – Polarization Mode Dispersion Source) que exibe um desempenho previsível, repetitivo e programável da DGD e da SOPMD [36]. Como esta PMDS fornece valores estáticos de DGD e SOPMD combinados, conforme mostrado no mapa de DGD x SOPMD (figura 44), é necessário que um embaralhador de polarização seja acoplado ao PMDS. Variando os valores combinados de DGD e SOPMD e recobrimdo a esfera de Poincaré, podemos construir um mapa da tolerância do sistema de transmissão e avaliar o desempenho do PMDC com uma boa amostragem.

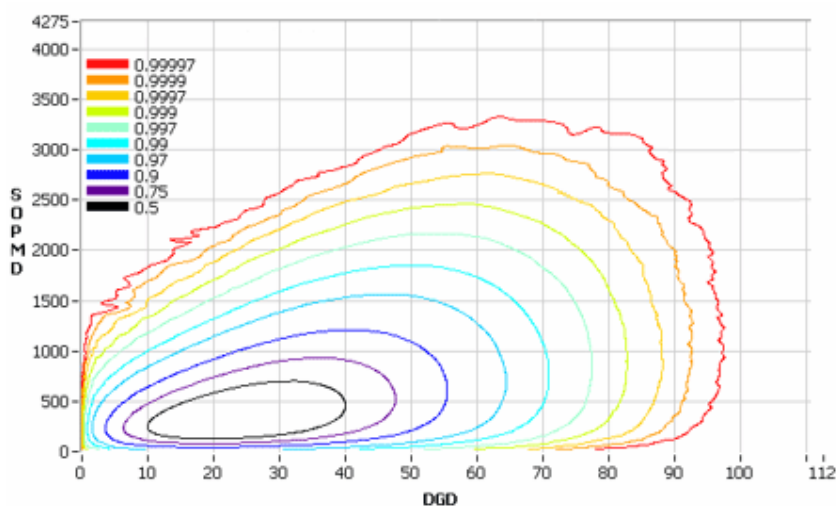


Figura 44 – Mapa de contorno da DGD x SOPMD onde as cores representam a função densidade de probabilidade conjunta para uma PMD média de 30ps.

Com o uso do E.FEC (Enhanced Forward Error Correction) no sistema de recepção de 43Gb/s uma taxa de erros de até  $1 \times 10^{-4}$  é suportada para a correção total elevando a taxa para  $1 \times 10^{-12}$ , com isso rajadas que atinjam a taxa de erro menor que o limite do E.FEC, mesmo que por microssegundos de duração,

ocasionam desastrosas rajadas de erros mesmo após a correção. Para a verificação do desempenho do PMDC com o E.FEC foi adotado o critério rígido de “OK”, ou “não OK”, para o sistema totalmente livre de erros ou para mais que algumas dezenas de bits errados, respectivamente.

### **5.3. Montagem experimental para transmissão de 43Gb/s**

O diagrama da figura 45 ilustra, de forma simplificada, a montagem experimental realizada para a avaliação do desempenho do PMDC. Foi utilizada uma taxa de 43Gb/s (STM-256 + E.FEC) gerada com diversos formatos de modulação para a comparação do desempenho. Um sistema E.FEC integrado ao sistema de transmissão e recepção também foi utilizado, podendo ser desligado de acordo com a medição a ser feita. Para as medidas de BER foi utilizado um tributário STM-1 extraído do STM-256, não comprometendo a estatística das medições, conseqüentemente a avaliação do PMDC.

Logo após os amplificadores da transmissão, foi colocado no enlace “embaralhadores” de polarização através dos controladores de polarização  $PC_1$ , e  $PC_2$  após a PMDS com o objetivo de recobrir toda a superfície da esfera de Poincaré. Amplificadores ópticos em cascata sem sinal de entrada no conjunto foram utilizados para gerar ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) que foi utilizada como fonte de ruído a fim de se verificar a margem da OSNR do sistema. A OSNR era aumentada ou reduzida de acordo com a atenuação ajustada após  $B_1$ .

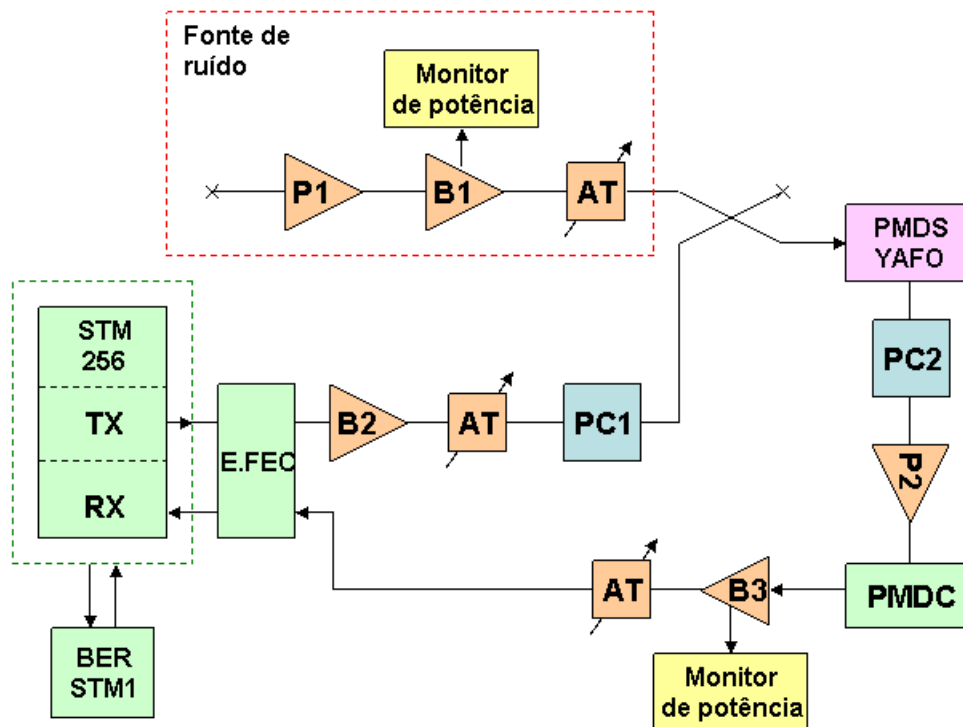


Figura 45 – Ilustração da montagem do sistema de 43Gb/s para avaliação do compensador de PMD em presença de uma fonte programável de PMD de 1ª e 2ª ordem.

#### 5.4. Embaralhamento da polarização

Os controladores de polarização  $PC_1$  e  $PC_2$  possuem 4 lâminas e podem ser ajustados modo aleatório com velocidades de rotação definidas. Para quantificar os níveis de velocidades ajustados nos controladores de polarização  $PC_1$  e  $PC_2$  em relação à frequência do sinal na saída de  $P_2$  foi utilizado um osciloscópio para a observação da frequência do sinal enquanto os níveis de velocidade eram ajustados nos controladores de polarização. A figura 46 mostra a correspondência da velocidade ajustada com a frequência máxima da flutuação do sinal devido ao embaralhamento da polarização. Uma DGD de 30 ps foi ajustada no PMDS para melhor observação do efeito.

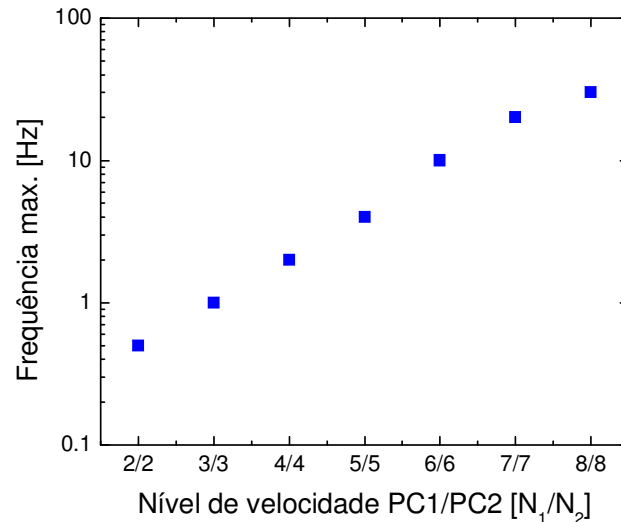


Figura 46 – Frequência máxima no espectro do sinal de realimentação versus o nível de velocidade do embaralhador de polarização.

### 5.5. Medidas com formato NRZ:

A figura 47 mostra o mapa da tolerância do sistema em relação à PMD e SOPMD combinadas ajustadas deterministicamente no PMDS, obtido para o enlace não compensado, ou seja, com o protótipo e linha de atraso fora do enlace. Os pontos azuis correspondem à operação normal livre de erros por pelo menos 200 segundos de tempo de medida. A duração deste tempo de teste foi escolhida com base no tempo total disponível para os testes com o PMDC nos laboratórios da Ericsson/Marconi em Gênova, assim, um tempo de amostra muito longo seria impossível realizar todos os testes desejados, apresentados aqui. Os pontos vermelhos representam condições de rajadas de erros com uma OSNR de 2,5dB. A velocidade dos misturadores de polarização eram 2 e 2. A potência de RF, utilizada como sinal de realimentação no compensador, disponível se encontrava na faixa de 18-43 GHz, que não é a faixa total correspondente ao sinal NRZ detectado. No entanto, essa parte do espectro é a mais sensível a distorção do sinal devido a PMD o que nos dá um sinal de realimentação mais sensível do que as componentes de baixa frequência (0-20 GHz). Uma tentativa de operação do sistema com o sinal de realimentação de frequência inferiores foi realizada, porém o desempenho do PMDC foi comprometido.

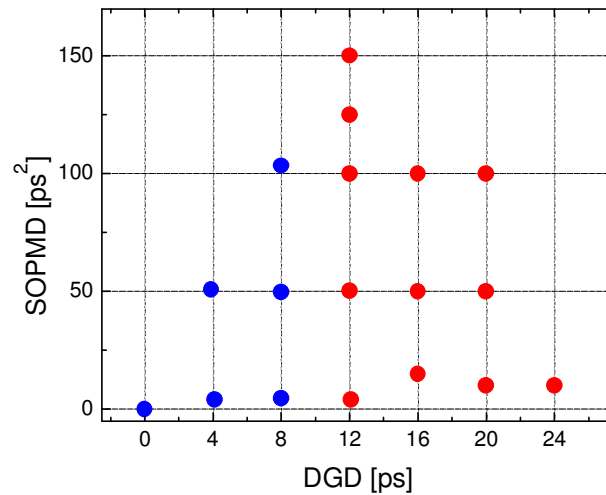


Figura 47 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erro para o sistema de transmissão, no formato NRZ, não compensado.

O primeiro teste com o PMDC incluiu uma linha de atraso de secção única de 12 ps com os resultados apresentados na figura 48. Como esperado foi observada um aumento na tolerância do sistema de 8 ps para 12 ps devido a compensação de PMD de 1a ordem, no entanto podemos observar também que a tolerância à PMD de 2a ordem foi reduzida, pois adicionando uma linha de atraso de secção única aumentamos a SOPMD total do sistema sem a possibilidade de compensação.

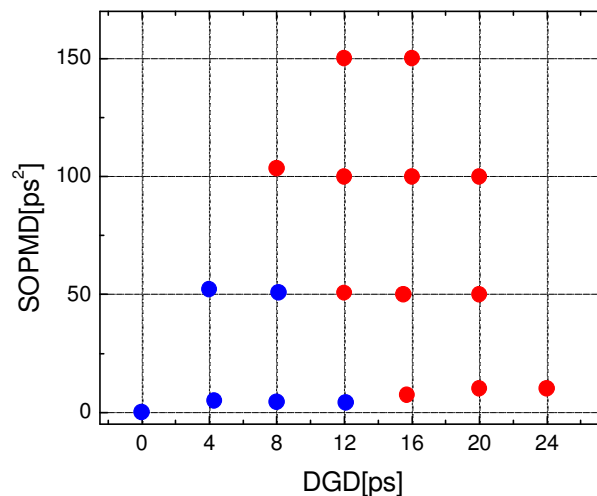


Figura 48 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erro para o sistema de transmissão, no formato NRZ, compensado com linha de atraso de uma secção com 12ps.

Seguindo com o experimento, combinações de diferentes valores de DGD das seções da linha de atraso composta por duas seções foram introduzidas no PMDC e o sistema foi avaliado também para diferentes valores de PMD de 1ª e 2ª ordem combinadas.

O desempenho do PMDC foi bem superior ao desempenho com configuração de linha de atraso simples. Os melhores resultados foram obtidos para uma DGD total de 15 ps na linha de atraso, com arranjos de (6 + 9) ps e (9 + 6) ps, conforme resultados demonstrados nas figuras 49 e 50.

Podemos notar que o desempenho do PMDC não é o mesmo apesar do fato das seções serem as mesmas, apenas com a inversão de ordem. O melhor desempenho foi obtido quando o maior valor de DGD foi colocado antes do menor, isso se deu porque a primeira seção tinha mais elementos de rotação de polarização. Outras combinações de PMD como (9 + 9) ps ou (12 + 4) ps, ou mesmo configurações de linha de atraso de três seções como (6 + 6 + 4) ps foram testadas, porém os resultados obtidos foram menos significativos do que os mostrados.

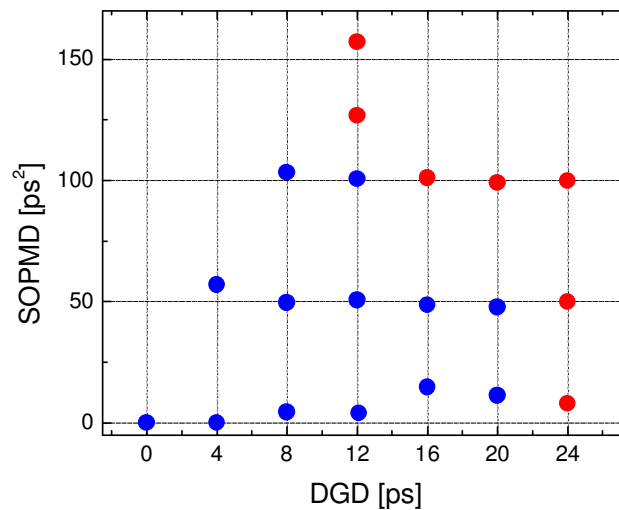


Figura 49 – Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato NRZ compensado com linha de atraso de duas seções (6 + 9)ps.



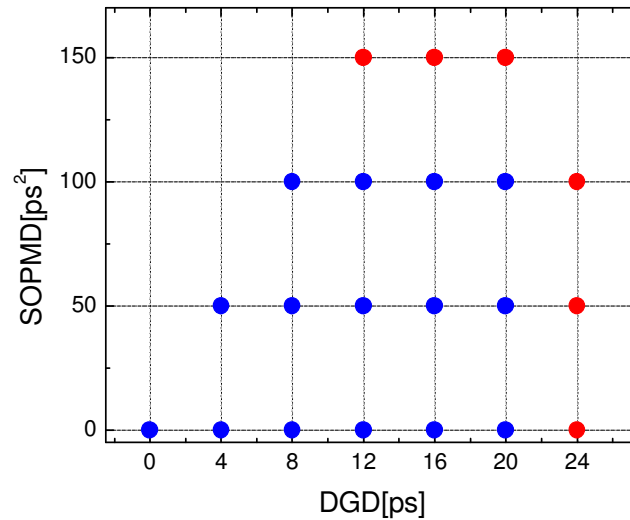


Figura 50 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato NRZ compensado com linha de atraso de duas seções (9 + 6)ps.

## 5.6.

### Medidas no formato RZ-DQPSK:

O formato de modulação RZ-DQPSK é muito robusto em relação à distorção pela PMD. Isso acontece principalmente porque os dados se encontram em taxas de 21,5Gb/s para cada uma das duas fases, para uma taxa de transmissão de 43Gb/s, sendo assim, menos sensíveis à PMD. O sistema proporciona um tom de 20 GHz, que tem o inconveniente de ser ambíguo quando valores elevados de DGD devem ser compensados. Inicialmente foi realizado um contorno do mapa de PMD e SOPMD combinadas para a configuração do sistema sem o PMDC, figura 51. A robustez deste formato sobre o NRZ é claramente visível. Uma margem de potência de 2dB foi utilizada nestas medições.

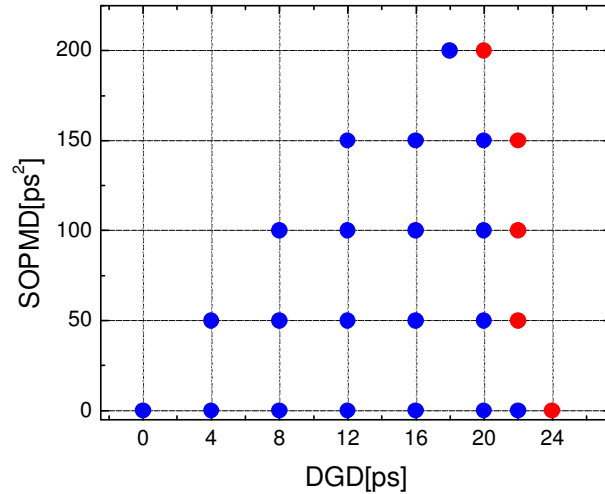


Figura 51 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato DQPSK com 2.0 dB de margem.

O teste com o PMDC configurado para linha de atraso de uma secção mostrou uma degradação do desempenho do sistema, mas a compensação com a configuração de duas secções (6 + 4) ps obteve uma melhora de 0,5 dB na margem de potência e tolerância à PMD, como mostrado na figura 52.

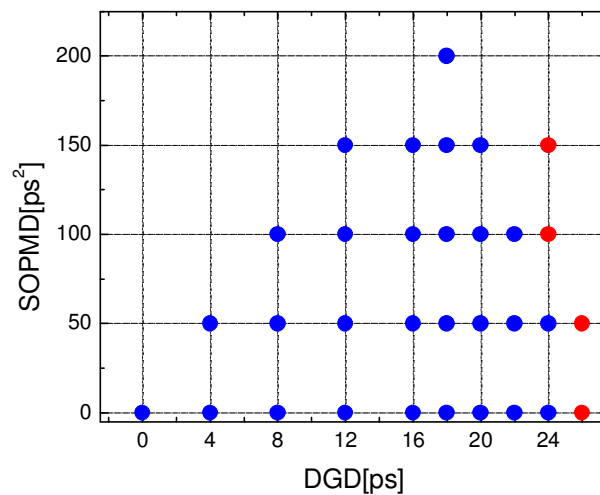


Figura 52 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato DQPSK compensado com linha de atraso de duas secções (6 + 4)ps e 1.5 dB de margem.

Testes com configurações de linhas de atraso com DGD total maiores também foram feitos, mas o sistema se tornou instável. Tal instabilidade pode ser

atribuída em grande parte ao sinal de realimentação, um tom de RF de 20GHz. Para grandes valores de DGD o sistema foi levado a uma situação de compensação errônea (por ambigüidade), no qual o tom de 20GHz foi levado ao seu maior valor de intensidade, porém as componentes com menores frequências do sinal foram fortemente atenuadas.

## 5.7.

### **Medidas no formato RZ-DPSK:**

Para o formato RZ-DPSK, o sinal óptico não apresenta variação no nível de intensidade, ou componente de frequência em AM, pois só a fase é modulada. Uma componente em AM foi encontrada presente no sinal da transmissão, porém devido ao resíduo da conversão AM-PM do modulador eletro-óptico. Assim, foi necessária a introdução de um interferômetro, que recuperasse o sinal real da intensidade modulada em relação à modulação de fase, para nos fornecer um sinal de RF para realimentação. Um interferômetro de 2 bits (o único disponível no momento) foi introduzido no braço de realimentação do PMDC para fazer a conversão PM-AM. O sinal de realimentação, com essa configuração, se encontrava muito ruidoso em relação aos formatos de modulação anteriores, o que nos impôs o uso de uma grande constante de tempo para a filtragem digital utilizada no PMDC e, conseqüentemente, uma resposta mais lenta. Na figura 53 apresentamos o mapa da tolerância do sistema em relação à PMD e SOPMD combinadas, obtido para o sistema de transmissão não compensado. A menor tolerância a PMD, em relação ao formato DQPSK, fica clara quando comparado aos resultados mostrados na figura 51.

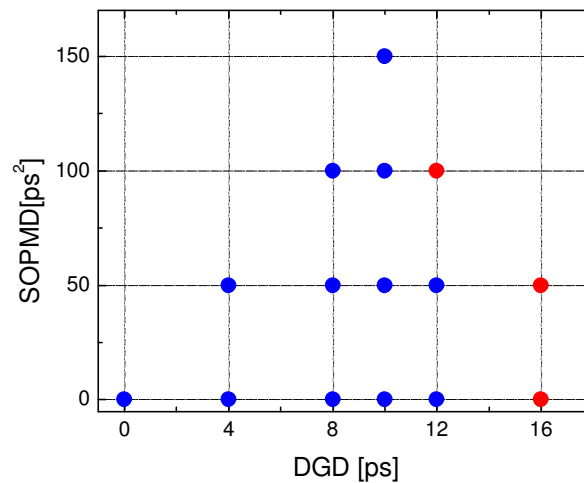


Figura 53 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato DPSK não compensado com 2,5dB de margem.

A figura 54 mostra o mapa para a tolerância do sistema de transmissão compensado, utilizando uma linha de atraso de duas seções, com (6+4) ps no PMDC. Como podemos verificar, o PMDC não foi capaz de aumentar a tolerância do sistema para a PMD, devido ao limitado tempo de resposta. Na verdade, este tipo de teste esgota situações de grande distorção durante todo o tempo, e o tempo de resposta do PMDC não foi suficiente para manter o sistema compensado. Ressaltando, novamente, que esse tempo de resposta lento foi produto de uma grande constante de tempo utilizada no filtro do PMDC, devido ao ruído no sinal de realimentação que nos foi proporcionado neste teste.

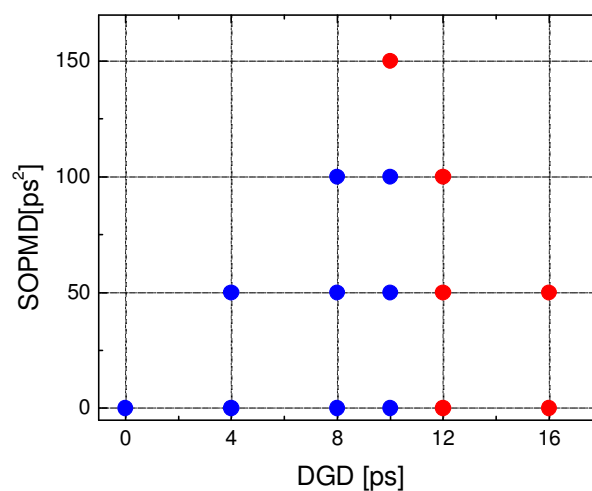


Figura 54 - Mapa de contorno da ocorrência de rajadas de erros para o sistema de transmissão, no formato DPSK compensado com linha de atraso de duas seções (6 + 4)ps e 2.5dB de margem.

### 5.8.

#### Comportamento do PMDC em presença do emulador de PMD estatístico em relação aos limites aceitáveis do FEC e OSNR.

Um emulador composto por quatro secções conectados através de misturadores de polarização foi utilizado para avaliar o PMDC sob variações de PMD mais próximas ao caso real. As duas primeiras secções do emulador eram emuladoras de PMD, ajustados para PMD de 1ª ordem (apenas DGD) com 4ps e 2ps. As outras duas secções eram fibras Hi-Bi, conforme ilustrado na figura 55.

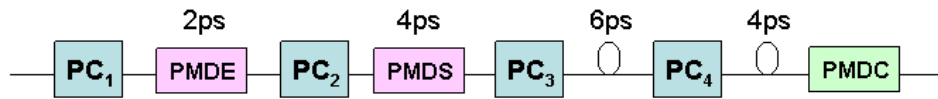


Figura 55 - Ilustração do esquema do emulador de PMD com misturadores de polarização utilizando as fontes de PMD e duas fibras Hi-Bi de 6ps e 4ps.

O esquema, como ilustrado na figura 55, foi colocado no link de transmissão, como mostrado na figura 56. As medições com e sem o PMDC foram feitas a fim de se verificar a melhoria do desempenho do sistema com o uso do PMDC. Medições sem o E.FEC também foram realizadas com a mesma finalidade. O nível de velocidade 2 foi ajustado em todos os misturadores de polarização ( $PC_{1..4}$ ) utilizados.

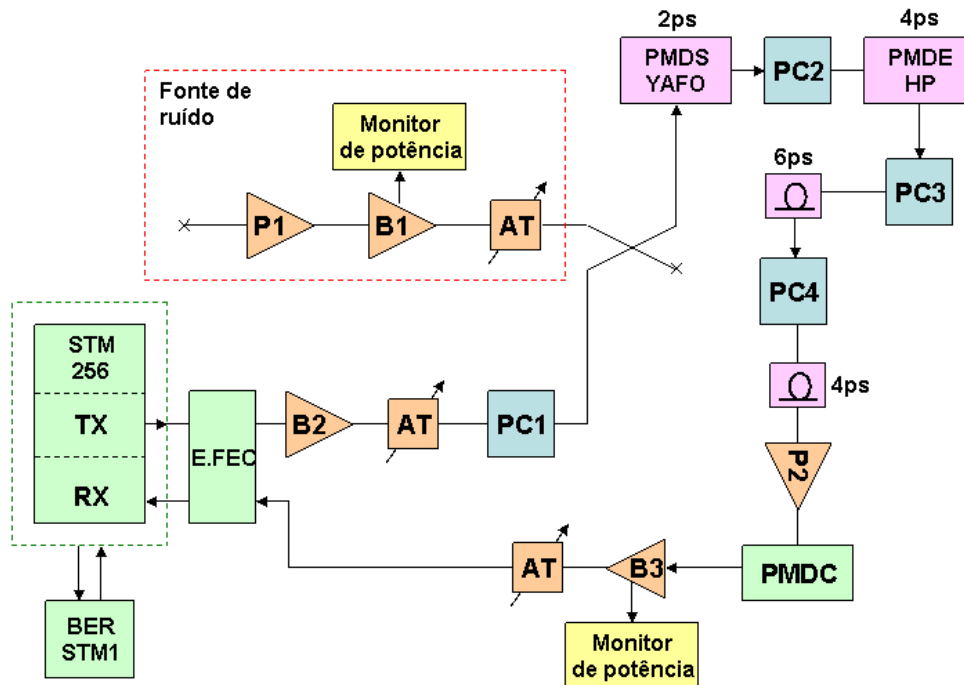


Figura 56 - Ilustração da montagem do sistema de 43Gb/s para avaliação do compensador de PMD em presença de um emulador estatístico de PMD.

Com o sistema sem o PMDC foi observada a ocorrência de rajadas de erros, a menos que o atenuador após B<sub>1</sub> conforme figura 56 fosse ajustado para uma margem de 7dB de OSNR. Com essa margem, o sistema se manteve livre de erros por mais de 2000 segundos. Quando o PMDC foi introduzido no sistema, a margem necessária para a operação livre de erros foi reduzida para 2,5 dB, indicando uma melhora de 4,5dB de margem na OSNR do sistema. Pode parecer surpreendente que o PMDC tenha promovido uma melhora tão significativa no desempenho do sistema para a compensação com o emulador dinâmico de PMD (PMD estatística), levando em conta a degradação do desempenho do sistema quando este emulador de PMD, (figuras 55,56), é inserido. De fato, a compensação da PMD estatística é mais favorável ao tempo de resposta lento do PMDC (devido ao ruído da realimentação), porque as variações e os altos valores de DGD ocorrem somente durante uma limitada fração de tempo, durante a qual, o PMDC consegue manter o sistema livre de erros. Para confirmar esta melhora na margem, desligamos o E.FEC e medimos a BER média em função da margem da OSNR, conforme resultados mostrados na figura 57. A medição da BER foi realizada durante um tempo longo o suficiente para que o emulador dinâmico de

PMD cobrisse uma grande variedade de situações de forma a resultar em uma medida estável de BER, independente da condição momentânea do emulador.

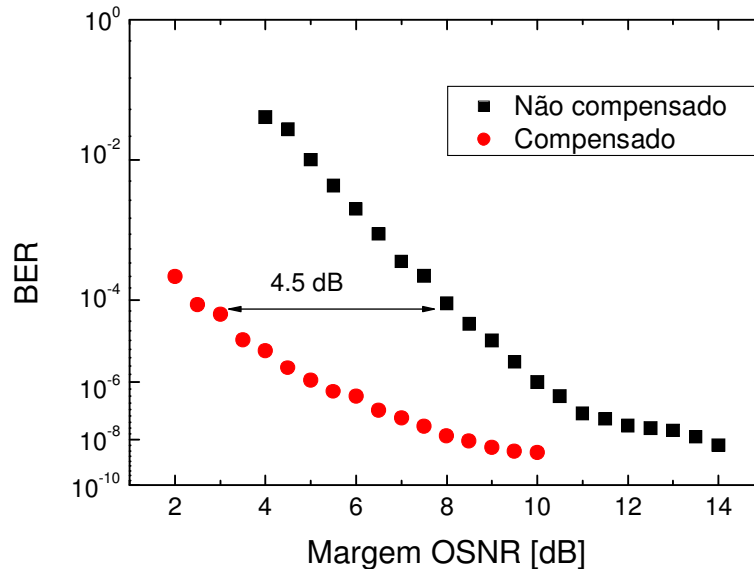


Figura 57 – Média da taxa de bits errados versus a margem da OSNR sem o uso do E.FEC.

Como é evidente na figura 57, a mesma melhora observada durante a operação do E.FEC foi observada na medição da BER média. É claro também que um patamar de BER foi observado nesta medição, isto porque acima de certo valor ajustado no atenuador de inserção de ASE, nenhum ruído é adicionado ao sistema e, portanto, nenhuma melhoria na BER pode ser obtida.

## 5.9.

### Comportamento do PMDC em presença da DGD e embaralhador de polarização em relação aos limites aceitáveis do FEC e OSNR.

Este teste foi feito com o formato DQPSK e o uso do E.FEC. Para realizar o teste variamos as velocidades dos misturadores de polarização PC<sub>1</sub> e PC<sub>2</sub>, mostrados na figura 45, e, fizemos a medição da frequência máxima da flutuação do sinal. Foram considerados pontos válidos somente aqueles cujos valores de DGD e frequência não implicaram em rajadas de erros durante o tempo de amostragem de aproximadamente 200s. A figura 46 mostra a correspondência das frequências observadas aos níveis de velocidade dos controladores (misturadores) de polarização utilizados. O emulador de PMD “YAFO” foi ajustado para

produzir uma DGD pura e a frequência de embaralhamento foi variada. Para cada valor de DGD, a frequência máxima de embaralhamento foi determinada. Os resultados são mostrados na figura 58.

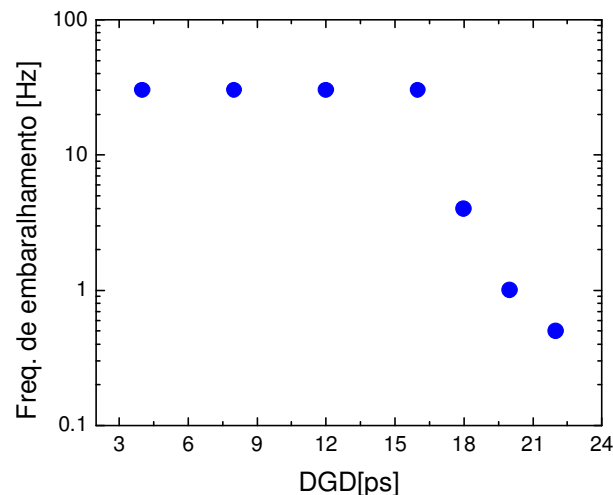


Figura 58 – Frequência máxima de embaralhamento da polarização versus DGD

Com essas medições, concluímos o teste do protótipo do PMDC em uma taxa de transmissão de 43GB/s, em diferentes formatos de modulação e utilizando E.FEC. O formato de modulação NRZ se mostrou mais sensível à distorção devido à PMD, no entanto, o PMDC melhorou significativamente seu desempenho. Entretanto, devido ao nível de ruído inesperado no sinal de realimentação, a margem da OSNR teve que ser aumentada de 0,5dB. Por motivos óbvios, a comparação das performances do sistema com e sem o PMDC foi feita com a mesma margem de OSNR de 2,5dB, não comprometendo, assim, o experimento e a análise posterior.

O formato RZ-DQPSK foi, de fato, o mais robusto em relação à distorção do sinal. Já é bem sabido que o formato RZ é mais robusto que o NRZ e, além disso, a taxa efetiva do sinal no formato RZ-DQPSK é a metade da taxa do fluxo de dados, o que torna este formato, pelo menos, duas vezes mais robusto do que os outros formatos de maior frequência.

O formato DPSK se mostrou mais robusto que o NRZ, porém menos, do que o DQPSK. Os testes feitos, com o PMDC neste formato, foram comprometidos com a falta de um interferômetro de 1 bit no braço de realimentação do PMDC, onde, no seu lugar, foi utilizado um de 2 bits para se



obter o sinal de realimentação. O alto nível de ruído, encontrado neste sinal comprometeu, de certa maneira, os testes, pois a velocidade de resposta do PMDC foi reduzida, devido ao alto número de amostras adquiridas para que se filtrasse o sinal de realimentação. No entanto, uma boa melhora pode ser observada nos testes estatísticos com o emulador dinâmico de PMD, no qual o PMDC proporcionou uma melhora de 4,5dB na margem da OSNR.